

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

# **Bakalářská práce**

**2014**

**Tomáš Babulák**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Univerzitní studijní programy**  
**Katedra automatizační techniky a řízení**

**Měření vibrací mechanických struktur**

**Vibration Measurements of Mechanical Structures**

Student:

Tomáš Babulák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

Ostrava 2014

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Tomáš Babulák**

Studijní program:

B3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906R006 Mechatronické systémy

Téma:

**Měření vibrací mechanických struktur**  
**Vibration Measurements of Mechanical Structures**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s modelem pro aktivní tlumení vibrací - model vetknutého nosníku a popište jeho strukturu.
2. Analyzujte dostupné možnosti snímačů a vyberte vhodný snímač pro měření výchylky na volném konci vetknutého nosníku se zaměřením na měření vyšších frekvencí kmitů.
3. Implementujte vybraný snímač do regulačního obvodu vetknutého nosníku, ověřte regulační proces a zaměřte se na měření nestabilních módů kmitání nosníku a tyto módy analyzujte.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a jejich použitelnost v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

PREUMONT, A., SETO, K. Active control of structures. New York: Wiley, 2008, 296 s. ISBN 978-0-470-03393-7.

CROCKER, M. (Editor), Handbook of noise and vibration control. New York: Wiley, 2007, 296 s. ISBN 978-0-471-39599-7.

TŮMA J. Diagnostika strojů. Ostrava: Skripta VŠB – TU Ostrava, 2009. 138 s. ISBN 978-80-248-2116-0.

TŮMA, J. Signal processing, Ostrava : Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009. 156 s. ISBN 978-80-248-2114-6.

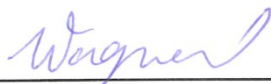
ŠURÁNEK, P. Aktivní tlumení vibrací: diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO, Katedra automatizační techniky a řízení, 49 s. Vedoucí práce: Tůma, J.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

  
doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.  
prorektor pro studium

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Havičské dne 19. 5. 2014

.....

podpis

## Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сје́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сје́днано, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Hati dne 19. 5. 2014

.....

podpis

Tomáš Babulák

Lipová 35/39

Hať 747 16



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Poděkování

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Příležitost pro mladé výzkumníky, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0016 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost, financovaného ze strukturálních fondů EU a státního rozpočtu ČR.

Děkuji především panu Ing. Miroslavu Mahdalovi, Ph.D. a panu Ing. Pavlu Šuránkovi za poskytnuté konzultace při přípravě mé bakalářské práce.

## ANOTACE

BABULÁK, T. *Měření vibrací mechanických struktur*, bakalářská práce, Ostrava: VŠB – TUO, Katedra automatizační techniky a řízení, 44s., Vedoucí práce: Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá měřením aktivního tlumení vibrací vetknutého nosníku. Cílem práce bylo sestavení regulačního obvodu s rychlostní zpětnou vazbou, kde měřicí člen je piezoelektrický akcelerometr. Oproti původnímu sestavení s laserovým snímačem polohy a s polohovou zpětnou vazbou, reguluje vyšší frekvence a zvýší se koeficient poměrného tlumení. V práci také navrhuji způsob eliminace nestabilních módů v procesu řízení při určitých vlastních frekvencích kmitání nosníku. Akční člen je realizován ve formě piezoaktuátoru. Návrh regulátoru byl proveden v programu MATLAB – Simulink, který byl implementován do signálového procesoru dSPACE.

**Klíčová slova:** all-pass filtr, band-pass filtr, regulace, modální analýza

## ABSTRACT

BABULÁK, T. *Vibration Measurements of mechanical structures*, bachelor thesis, Ostrava: VŠB – TUO, Department of Control Systems and Instrumentation, 44p., Supervisor: Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

The bachelor thesis deals with the measurement of active vibration control of cantilever beam. The aim was to build speed control loop with feedback, where the measuring element is a piezoelectric accelerometer. Compared with the original assembly, with the laser position sensor and position feedback, the new setting controls higher frequencies, and increases the damping coefficient. The paper also proposes a method for the elimination of unstable modes in the management process at certain natural frequencies of vibration of the beam. The actuator is realized in the form of piezoactuator. The controller design was implemented in MATLAB - Simulink, which was implemented in digital signal processor dSPACE.

**Keywords:** all-pass filter, band-pass filter, regulation, modal analysis

## Obsah

Seznam použitých značek a zkratk .....	10
Úvod .....	12
1 Snímače vibrací .....	13
1.1 Optické snímače .....	13
1.2 Indukční snímače .....	14
1.3 Kapacitní snímače .....	16
1.4 Piezoelektrické akcelerometry .....	17
1.5 Tenzometrické snímače .....	18
2 Návrh měřicího řetězce .....	20
2.1 Seznámení s původním modelem vetknutého nosníku .....	20
2.1.1 Snímač výchylky .....	21
2.1.2 Piezoaktuátor .....	21
2.2 Návrh vlastního měřicího řetězce .....	22
2.2.1 Výběr snímače .....	23
2.2.2 Výběr nábojového zesilovače .....	23
2.2.3 Výběr zesilovače .....	24
2.2.4 Měřicí karta dSPACE .....	24
3 Realizace zpětnovazebního řízení .....	25
3.1 Zpětnovazební řízení s laserovým snímačem polohy .....	25
3.2 Zpětnovazební řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení .....	26
3.3 Vizualizace .....	27
4 Určení potencionálně nestabilních módů .....	29
5 Návrh eliminace módů .....	35



5.1	Zpětnovazební řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení a band-pass filtrem .....	35
5.2	Zpětnovazební řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení a all-pass filtrem 2. řádu.....	38
6	Závěr .....	41
	Seznam použité literatury .....	43

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK

$a$	- zrychlení	$[\text{ms}^{-2}]$
$b$	- šířka průřezu	$[\text{mm}]$
$C$	- kapacita	$[\text{F}]$
$d$	- vzájemná vzdálenost desek	$[\text{m}]$
$E$	- Youngův modul pružnosti	$[\text{Pa}]$
$F$	- síla	$[\text{N}]$
$f_i$	- frekvence rezonančního vrcholu	$[\text{Hz}]$
$f_n$	- frekvence n-tého módu	$[\text{Hz}]$
$h$	- výška průřezu	$[\text{mm}]$
$J$	- moment setrvačnosti	$[\text{kgm}^2]$
$K_i$	- zesílení filtru	$[-]$
$l$	- délka nosníku	$[\text{m}]$
$l_o$	- délka odporového materiálu	$[\text{m}]$
$M$	- hmotnost	$[\text{kg}]$
$R$	- odpor	$[\Omega]$
$S$	- plocha průřezu	$[\text{mm}^2]$
$S_c$	- plocha vzájemného překrytí desek kondenzátoru	$[\text{m}^2]$
$S_r$	- plocha průřezu materiálu	$[\text{m}^2]$
$S_{xy}(t)$	- vzájemná spektrální výkonová hustota	$[\text{m}^2]$
$S_{yy}(t)$	- spektrální výkonová hustota	$[\text{m}^2]$
$\Delta f_{B\pi i}$	- šířka propuštěného pásma	$[\text{Hz}]$
$\varepsilon$	- permitivita prostředí	$[-]$
$\varepsilon_0$	- permitivita vakua ( $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ )	$[\text{Fm}^{-1}]$

$\lambda$	- kořen frekvenční rovnice	[-]
$\xi_i$	- koeficient poměrného útlumu i-tého módu	[-]
$\rho$	- hustota	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\rho_m$	- měrný odpor materiálu	[Ωm <sup>-1</sup> ]
$\Omega$	- vlastní kruhová rychlost	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$\omega_i$	- vlastní kruhová rychlost i-tého módu	[rad·s <sup>-1</sup> ]

## ÚVOD

Mechanické vibrace jsou součástí každodenní zkušenosti moderního člověka ve všech možných odvětvích. V přírodě, v hudbě, dokonce i ve strojním a stavebním odvětví. Zatímco vibrace vyvozované v přírodě a hudbě mohou být užitečné, ve strojním a stavebním průmyslu jsou vysoce nežádoucí, proto stavěné konstrukce strojů jsou navrhovány tak, aby nedošlo k destrukci vlivem vibrací. Pro příklad konstrukce výškových budov či mostních konstrukcí jsou navrženy tak, aby vibrace způsobené prouděním větru nebyly v souladu s rezonanční frekvencí, která je rovna některé vlastní frekvenci budovy.

Znalost vibračních charakteristik nám pomáhá lépe porozumět těmto soustavám, čímž můžeme předcházet závadám, destrukci, či zvýšení komfortu konečného produktu.

Tohoto můžeme docílit několika způsoby. Nejčastěji používané je ztužování konstrukcí, což posune rezonanční frekvenci nad rámec budících sil, přidání tlumení, které maří energii, či přidání izolace, která zabraňuje průnikům vibrací.

Pro tlumení lze využít aktivního, či pasivního tlumení. Aktivní tlumení využívá řízeného aktivního prvku v regulačním obvodu, což vyžaduje snímače a řídicí algoritmus. Oproti tomu pasivní tlumení využívá různé druhy tlumičů kapalinových, vzduchových nebo pryžových. Tomuto druhu tlumení obvykle není nutné dodávat energii, avšak jejich funkci nelze řídit.

# 1 SNÍMAČE VIBRACÍ

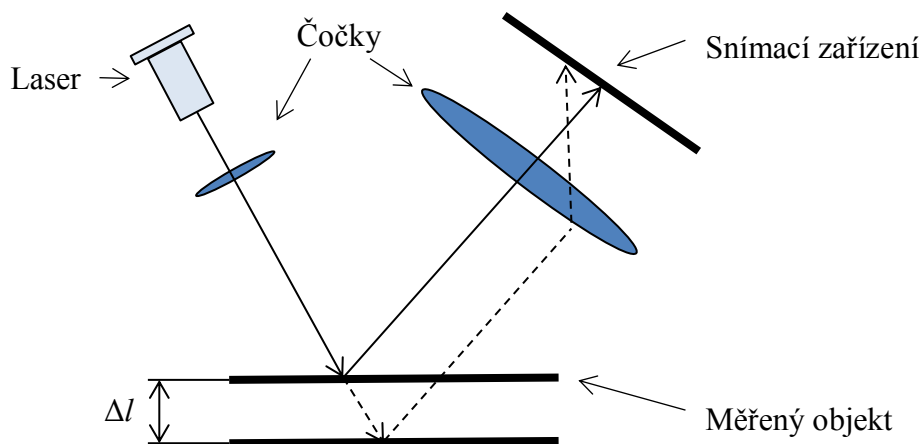
V této kapitole budou popsány a vysvětleny základní principy nejběžnějších prostředků ke snímání polohy, rychlosti a zrychlení.

## 1.1 Optické snímače

Princip optických snímačů spočívá ve využití optického zdroje elektromagnetického záření, které dopadá přes polopropustné zrcadlo na měřenou plochu. Následně se dá podle odrazu určit výchylka.

### Triangulační laserové snímače výchylky

Triangulační snímače výchylky využívají paprsku koherentního světla dopadající na měřený objekt. Při pohybu měřené plochy se mění úhel odrazu. Paprsek následně dopadá přes systém čoček na snímací zařízení, čímž se vyhodnocuje posunutí měřeného objektu



Obr. 1 – Základní schéma triangulačního optického snímače výchylky

### Dopplerovské snímače rychlosti

Dopplerovské snímače rychlosti jsou založeny na Dopplerově jevu, který popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného signálu, způsobenou nenulovou vzájemnou

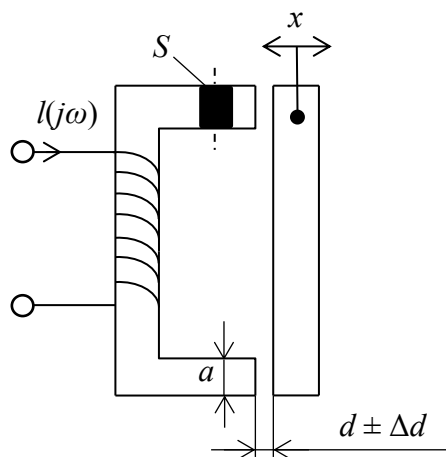
rychlostí vysílače a přijímače. Pro detekci změny vlnové délky se používá interferometr, jehož princip je založen na interferenci světla.

## 1.2 Indukční snímače

Principem těchto snímačů je v převodu polohy na změnu vlastní indukčnosti  $L$ , případně vzájemné indukčnosti  $M$ . Výhodně lze provádět změnu indukčnosti u cívky s železným jádrem, které slouží jako seismická hmota, kde efektivní ohmický odpor závisí na ztrátě v magnetickém poli cívky. Lze dosáhnout toho, že magnetický odpor bude úměrný deformaci.

### Tlumivkové snímače s uzavřeným magnetickým obvodem

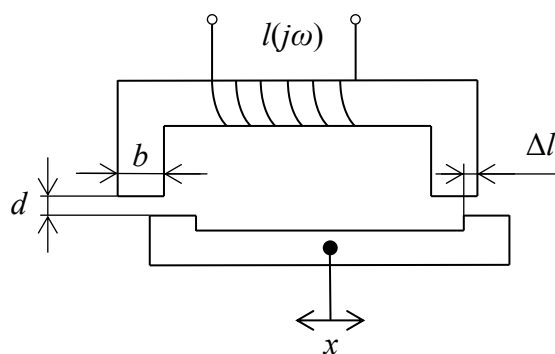
Tento typ snímače (Obr. 2) má proměnnou vzdálenost mezi jádrem a měřenou součástí. Vlastní indukčnost závisící na vzdálenosti  $d$  je hyperbolická, proto se snímač používá pouze v oblasti, kde je převodní charakteristika přibližně lineární, to znamená, že je vhodná zejména pro měření posuvů v řádu jednotek milimetrů.



Obr. 2 – Schéma indukčního snímače s proměnnou vzduchovou mezerou

### Tlumivkové snímače s proměnnou plochou vzduchové mezery

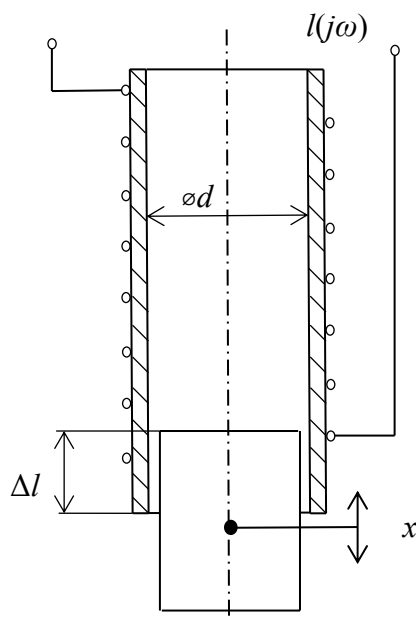
Tyto snímače mají proměnnou plochu vzduchové mezery. Závislost vlastní indukčnosti na  $\Delta l$  je přibližně lineární, proto ji lze použít pro měření středních posunů.



Obr. 3 – Schéma indukčního snímače s proměnnou plochou vzduchové mezery

### Tlumivkové snímače s otevřeným magnetickým obvodem

Princip spočívá ve změně indukčnosti cívky v závislosti na poloze feromagnetického jádra. Tyto snímače měří velké posuvy, avšak jejich přesnost ani linearita nejsou příliš dobré.



Obr. 4 – Schéma indukčního snímače se změnou polohy jádra v cívce

### 1.3 Kapacitní snímače

Princip akcelerometru s proměnnou kapacitou spočívá ve změně kapacity vnitřního proměnného kondenzátoru vlivem síly způsobené změnou polohy, čehož je nejčastěji dosaženo změnou vzdálenosti desek kondenzátoru.

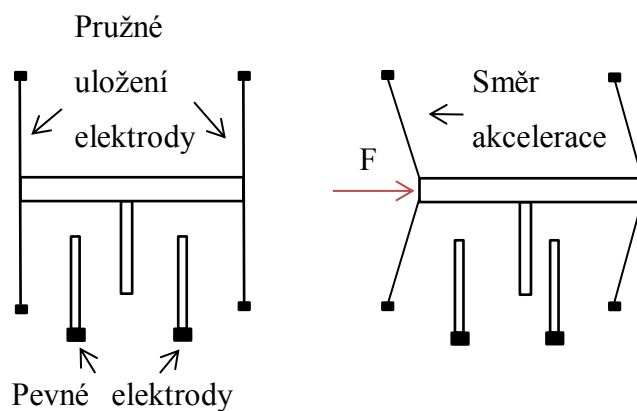
Kapacita kondenzátoru je dána vztahem:

$$\Delta C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{\Delta d} [F] \quad (1.1)$$

kde je

$\varepsilon_0$	– permitivita vakua ( $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ) [ $\text{Fm}^{-1}$ ]
$\varepsilon$	– permitivita prostředí [-]
$S_c$	– plocha vzájemného překrytí desek kondenzátoru [ $\text{m}^2$ ]
$d$	– vzájemná vzdálenost desek [m]

Příklad jednoduchého akcelerometru je znázorněn na Obr. 5, kde jsou dvě pevné elektrody, mezi nimiž je pohyblivá elektroda pružně přichycena k základně.



Obr. 5 – Základní schéma akcelerometru s proměnnou kapacitou

Výhodou tohoto akcelerometru je malý rozměr snímače a nízká hmotnost. Také je možné měřit statické zrychlení.



## 1.4 Piezoelektrické akcelerometry

Akcelerometr je zařízení, které měří zrychlení při pohybu struktur (konstrukce, části strojů apod.) pomocí převodu zrychlení na elektrický signál. V posledních letech tyto senzory zaznamenaly významný vývoj nejen v mobilním a herním odvětví elektroniky a automobilovém průmyslu (detekce nehod, alarmy), ale i v odvětví strojírenském a stavebním pro analýzy a následné odrušení nežádoucích vibrací.

Akcelerometry mohou měřit statické (gravitační), ale i dynamické zrychlení. Měření statického zrychlení lze využít pro měření náklonu a tudíž jej použít jako inklinometr. Statické zrychlení je již svou definicí neustále přítomné, proto je nutné při měření dynamického zrychlení jej filtrovat. Při měření dynamického zrychlení můžeme analyzovat směr, kterým se akcelerometr pohybuje. Dnešní akcelerometry mnohdy poskytují jak měření statického, tak měření dynamického zrychlení v rámci jednoho integrovaného obvodu, jenž obsahuje i vyhodnocovací obvod.

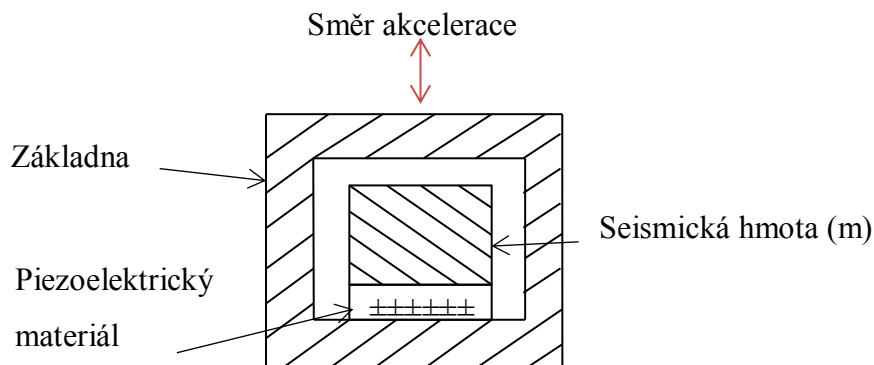
Při výběru akcelerometru je nutné zvážit rozsah měřeného zrychlení, dynamický rozsah, rezonanční frekvenci, frekvenční odezvu a v neposlední řadě citlivost. Hmotnost akcelerometru by měla být také nižší, než je měřený systém, aby příliš neovlivnila výsledky měření.

Piezoelektrický akcelerometr se skládá ze seismického tělíska a piezoelektrického materiálu generujícího náboj úměrný namáhání způsobenému zrychlením. Jako piezoelektrický materiál je často používán výbrus krystalu oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$  nebo baryum titanu  $\text{BaTiO}_3$ .

K měření zrychlení je využit piezoelektrický jev, kde při zrychlení dochází ke stlačení nebo natažení krystalu působením seismické hmoty. V krystalu následně dochází ke změně náboje  $Q$ , vlivem přesunu iontů krystalovou mřížkou, čímž dochází na výstupních elektrodách ke změně napětí.

Tyto akcelerometry jsou velice výhodné pro svou malou velikost a linearitu převodu. Další velká výhoda je necitlivost vůči parazitnímu magnetickému poli nebo možnost měření vysokých hodnot zrychlení.

Naopak nevýhodou může být nízká hodnota výstupního signálu nebo závislost na teplotě způsobené pyroelektrickým jevem, který je třeba kompenzovat. Také neumožňují měření statického zrychlení.

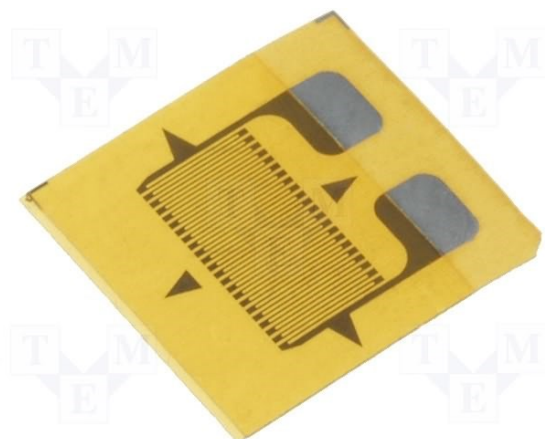


Obr. 6 – Základní schéma piezoelektrického akcelerometru

## 1.5 Tenzometrické snímače

Nejpoužívanější u akcelerometrů je odporový tenzometr. Odporový tenzometr je pasivní elektronická součástka, která se využívá pro nepřímá měření mechanického napětí na povrchu součásti prostřednictvím vlastní deformace. Tyto tenzometry lze rozdělit na drátkové, fóliové (Obr. 7) a napařované.

Nejjednodušší příklad využití tenzometru jako akcelerometru je soustava tenzometrnosník (Obr. 8) na jehož konci je seismická hmota. Tato soustava kmitajícího nosníku je citlivá na okolní teplotě, proto se v praxi používá Wheatstoneův můstek, kde jeden tenzometr je natahován a druhý stlačován, čímž kompenzujeme vliv teploty a odpory přívodů.



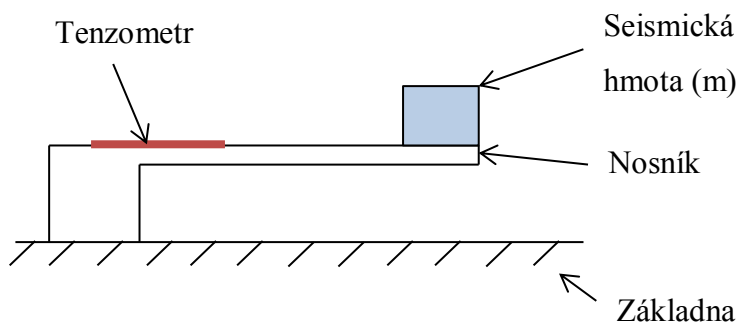
Obr. 7 – Fóliový tenzometr [TME, 2013]

Při zrychlení dochází vlivem setrvačnosti seismické hmoty k ohybu nosníku, který se projevuje natažením či stlačením odporového materiálu tenzometru. To se pak projeví na výsledném odporu, který je popsán vztahem:

$$\Delta R = \rho_m \cdot \frac{\Delta l_o}{S} \quad (1.2)$$

kde je

$\rho_m$	– měrný odpor materiálu [ $\Omega\text{m}^{-1}$ ]
$l_o$	– délka odporového materiálu [m]
$S_r$	– plocha průřezu materiálu [ $\text{m}^2$ ]



Obr. 8 – Základní schéma tenzometrického akcelerometru

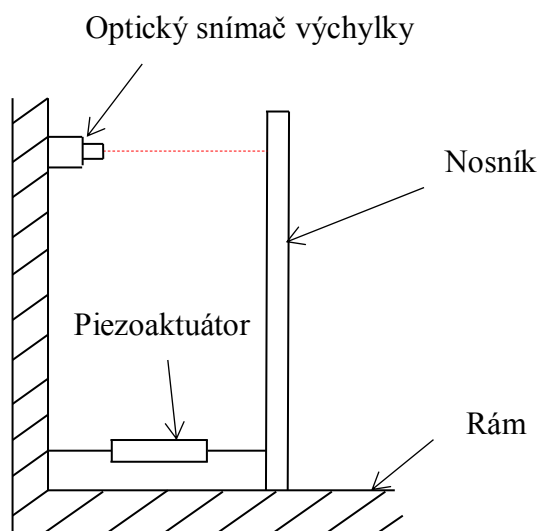
Tento typ akcelerometru je zejména vhodný pro měření rychle měnících se hodnot zrychlení, avšak nevýhodou může být vysoká velikost snímače.

## 2 NÁVRH MĚŘICÍHO ŘETĚZCE

Při návrhu měřicího řetězce se musíme v první řadě seznámit s původním modelem vetknutého nosníku. Dále si musíme určit změny v modelu a výhodné umístění snímače na nosníku.

### 2.1 Seznámení s původním modelem vetknutého nosníku

Původní laboratorní model vetknutého nosníku pro aktivní tlumení vibrací byl sestaven ze stavebnicového systému ITEM, který minimalizuje veškeré vůle v modelu. Dále se skládá z měřeného nosníku, piezoaktuátoru P-845.60, optického snímače výchylky Micro-Epsilon ILD 1300-20 a signálového procesoru dSPACE.



Obr. 9 – Model pro aktivní tlumení vibrací vetknutého nosníku

### 2.1.1 Snímač výchylky

Použitý snímač výchylky funguje na principu optické triangulace. Poskytuje měřicí rozsah 20 mm, vzorkovací frekvenci 500 Hz, nepřesnost  $\pm 0,2$  % z rozsahu, rozlišitelnost 4  $\mu\text{m}$  a standardní proudový výstup 4÷20 mA.

Z důvodu potřeby napět'ového signálu pro systém dSPACE, byl vytvořen plošný spoj, který je schopen převést proudový signál snímače na napět'ový.

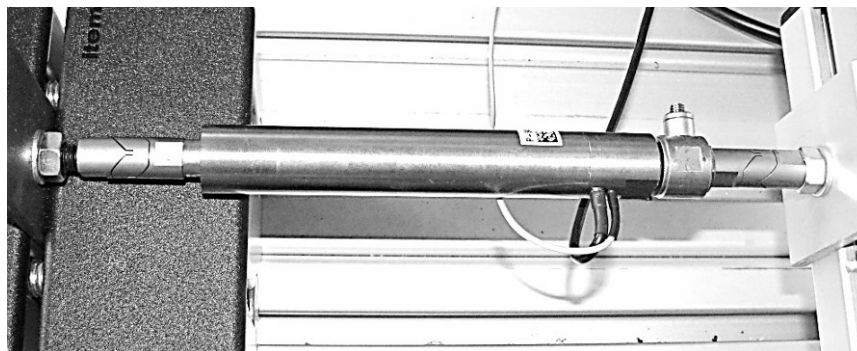
### 2.1.2 Piezoaktuátor

Piezoaktuátor je akční člen využívající piezoelektrického jevu, což je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci, případně deformovat se vlivem elektrického napětí. Je schopen vyvinout velké síly o malém zdvihu. Nejčastěji používanou piezoelektrickou látkou je křemen a keramika.

Použitý piezoaktuátor poskytuje zdvih 90  $\mu\text{m}$ , sílu 3 000 N v tlaku, 700 N v tahu. Piezoaktuátor je připojen k servozesilovači E-500.00, který zesiluje napět'ový signál 0÷10 V na hodnotu napětí -20÷120 V.

Piezoaktuátor je vybaven snímačem posunutí a regulačním obvodem, který reguluje hodnotu zdvihu.

Při montáži je nutné zajistit, aby nebyl namáhaný krutem, jinak hrozí jeho zničení. Použitý model má povolený utahovací moment 1 Nm, proto je vhodné, pro zabránění přenosu nežádoucích ohybových momentů, použít pružnou koncovku.



Obr. 10 – Piezoaktuátor P-845-60 [Šuránek, 2013]

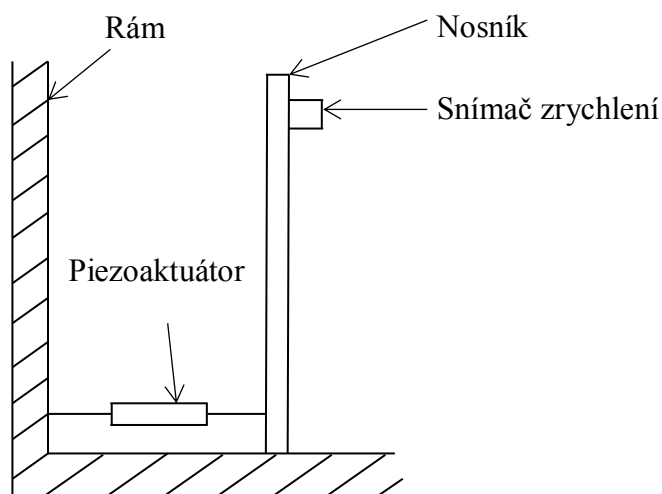


Obr. 11 – Servozesilovač E-500.00

## 2.2 Návrh vlastního měřicího řetězce

Laboratorní model vetknutého nosníku využívající optický senzor polohy má největší problém v malé vzorkovací frekvenci a to pouhých 500 Hz. Při této vzorkovací frekvenci bylo aktivní tlumení vibrací velice neefektivní, proto si tato bakalářská práce dala za úkol vybrat a vylepšit celkové tlumení vibrací.

V nové soustavě pro aktivní tlumení vibrací byl vyměněn optický snímač výchylky za piezoelektrický akcelerometr s nábojovým zesilovačem, předzesilovačem a platformou dSPACE pro analýzu měření.



Obr. 12 – Upravené schéma modelu pro aktivní tlumení vibrací

### 2.2.1 Výběr snímače

Požadavkem pro výběr akcelerometru bylo zaznamenávat vyšší frekvence kmitu do 5 kHz. Po průzkumu trhu a analýze vlastností dostupných akcelerometrů byl vybrán piezoelektrický akcelerometr NP-2910 firmy Ono Sokki. Tento akcelerometr je schopen zaznamenat frekvenci až do 20 kHz, což více než vyhovuje zadaným požadavkům. Poskytuje přesnost  $0,306 \text{ pC/ms}^{-2}$ . Pro svou nízkou váhu 2 g je velice výhodný pro naši aplikaci, protože nebude příliš ovlivňovat svou hmotností vibrace samotného nosníku.



Obr. 13 – Akcelerometr NP-2910 [Ono Sokki, 2013]

### 2.2.2 Výběr nábojového zesilovače

Nábojový zesilovač je jednoduchý typ převodníku signálu, který převádí elektrický náboj na napěťový signál. Pro aplikaci v modelu jsem vybral nábojový zesilovač CH-6130 firmy Ono Sokki, který je vhodný pro vybraný akcelerometr. Propojení senzorem probíhá pomocí konektoru BNC a výstupní signál používá CCLD. Poskytuje frekvenční rozsah od 2 do 45 kHz se zesílením  $1 \text{ mV/pC}$ .



Obr. 14 – Nábojový zesilovač CH-6130 [Ono Sokki, 2013]

### 2.2.3 Výběr zesilovače

Pro lepší zpracovatelnost signálu bylo nutné přidat zesilovač, který transformuje vysoké impedance vstupního signálu na nízké impedance signálu napětí, které mohou být přenášeny na delší vzdálenosti. Zesilovač využívá IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) standard, který je kompatibilní s platformou PULSE od firmy Brüel & Kjær.

Vybraný zesilovač M28 poskytuje vstupní a výstupní konektory BNC, zesílení 1 s chybou  $\pm 0,5\%$  a frekvenčním rozsahem 0,1 až 100 kHz.



Obr. 15 – Zesilovač M32 a M28 [Metra Mess, 2013]

### 2.2.4 Měřicí karta dSPACE

Pro měřicí obvod jsem použil měřicí kartu dSPACE DS1104. Tato karta je real-time hardware založený na PowerPC technologii. Napětíové vstupy a výstupy se vstupním napětím  $\pm 10\text{ V}$  dělají měřicí desku vhodnou pro různé obory, jako je automatizace, robotika, nebo i letectví. Velikou výhodou je také programovací rozhraní přes program Matlab-Simulink.



Obr. 16 – Měřicí karta dSPACE DS1104 [dSPACE, 2014]



### 3 REALIZACE ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ

Při realizaci zpětnovazebního řízení bylo v první řadě potřeba ověřit původní řízení s optickým senzorem polohy a následně nahrazení akcelerometrem, který výslednou regulaci vylepší. Regulační obvod byl sestaven v programu Matlab-Simulink a pomocí vizualizačního programu Control Desk nahrán na kartu dSPACE.

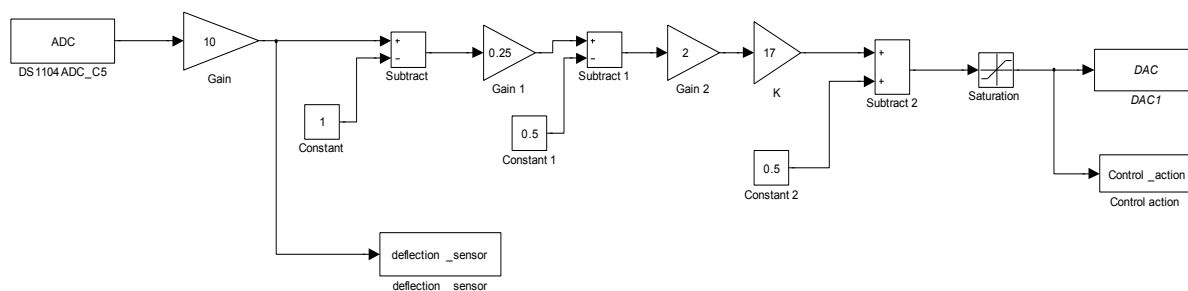
#### 3.1 Zpětnovazební řízení s laserovým snímačem polohy

Při zpětnovazebním řízení s laserovým snímačem polohy bylo nutné provést úpravu signálu na dále lépe využitelné hodnoty. Vstupní signál ze snímače, který nabývá hodnot  $1 \div 5$  V prochází přes měřicí kartu dSPACE, která dává programu Matlab-Simulink signál úrovně  $0,1 \div 0,5$  V. Po zesílení  $10\times$  blokem 'Gain' bylo dosaženo skutečné hodnoty napětí. Následným odečtením hodnoty 1, vynásobením 0,25 a odečtením 0,5 se dostaneme na hodnoty  $\pm 0,5$  V. Vynásobením dvěma na hodnotu  $\pm 1$  V, kvůli rozsahu výstupu karty dSPACE.

Dalším v řadě je P-regulátor, který pracuje s trvalou regulační odchylkou. Jeho výhodou je velice dobrá stabilita.

Poslední v řadě je úprava výstupního signálu, ke kterému se přičte hodnota 0,5. Tato hodnota posune střední hodnotu výstupního signálu na 0,5 V, čímž lze využít efektivněji piezoaktuátor. Nechtěné zničení piezoaktuátoru je ošetřeno saturací, která omezuje signál na  $0 \div 1$  V. Toto napětí měřicí karta dSPACE zesiluje na hodnoty  $0 \div 10$  V, s kterými piezoaktuátor pracuje.

RTI Data



Obr. 17 – Simulační schéma pro laserový snímač polohy

### 3.2 Zpětnovazební řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení

Po ověření regulace pomocí laserového snímače polohy již bylo možné nahradit senzor za akcelerometr. Při zpětnovazebním řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení se postupovalo obdobně jako u řízení s laserovým snímačem polohy.

Vstupní signál z karty dSPACE byl vynásoben 10, aby se dostal na skutečnou hodnotu napětí. Tato hodnota je ovšem špatně představitelná, proto je dalšími bloky převedeno napětí na zrychlení. Toho bylo dosaženo zpětným násobením v regulačním obvodu nejdříve zesilovačem se zesílením signálu 100x, předzesilovačem, který má zesílení 1 mV/pC a nakonec snímačem, se snímáním zrychlení s citlivostí 0,306 pC/ms<sup>-2</sup>.

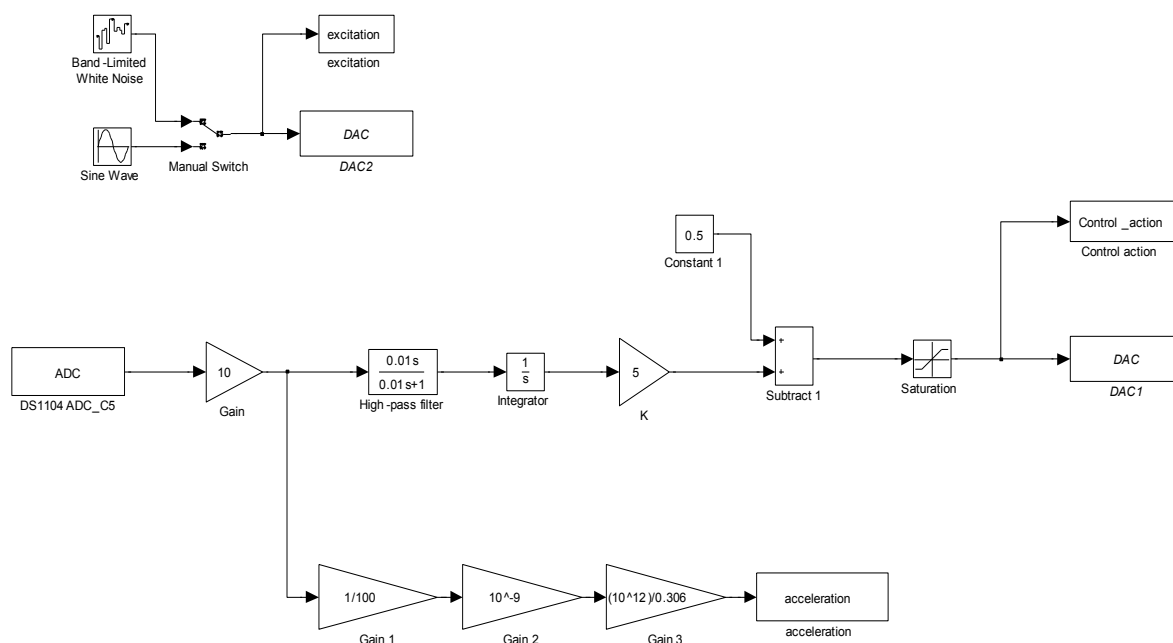
Dalším blokem v obvodu je použit filtr horní propust, který odfiltroval stejnosměrnou složku signálu. Tato složka se kvůli integrátoru integrovala donekonečna, díky čemuž obvod nefungoval správně.

Také z tohoto důvodu je volena rychlostní zpětná vazba. Měřené zrychlení bylo tudíž integrováno pouze jednou. Žádaná hodnota byla nastavena na nulovou rychlost.

P-regulátor byl nastaven na zesílení 5, které odpovídalo nejlepším výsledkům tlumení. Hodnota regulátoru byla určena empiricky.

Základní sestavení regulačního obvodu i přes poměrně dobré tlumení není úplně ideální z důvodu špatného tlumení na určitých frekvencích, které jsou dány vlastními frekvencemi nosníku. K určení těchto frekvencí slouží tzv. modální analýza.

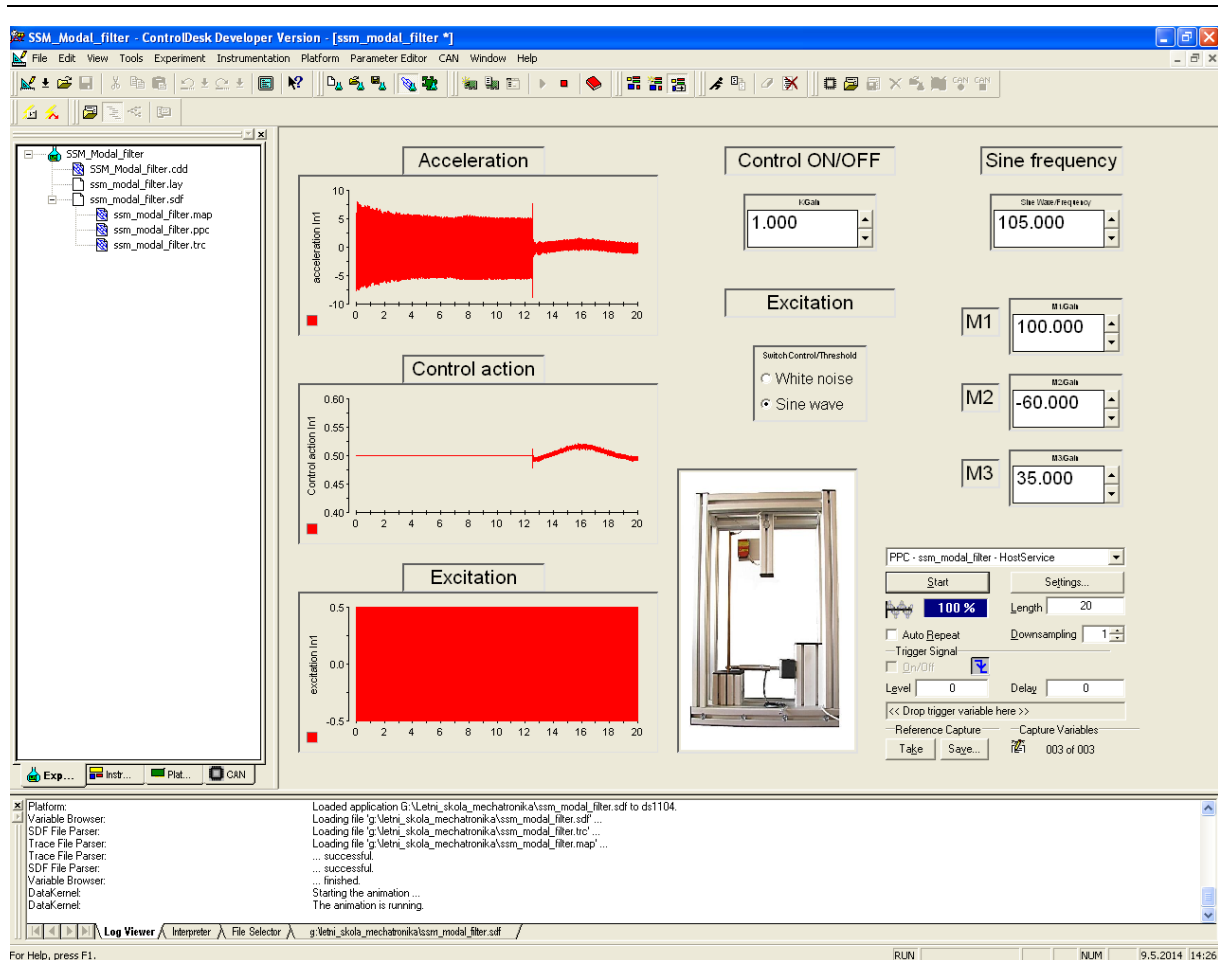
RTI Data



Obr. 18 – Simulační schéma pro piezoelektrický snímač zrychlení

### 3.3 Vizualizace

Program Control Desk byl použit jako grafické rozhraní mezi Matlab-Simulink a dSPACE. V našem případě je zobrazen v trendu výstupní signál z akcelerometru, akčního zásahu, což je signál na piezoaktuátor a buzení, které bylo možné nastavit buď na sinusový signál nebo bílý šum. Rozhraní také umožňuje nastavení měření otevřeného či uzavřeného regulačního obvodu, zesílení filtrů a nastavení ukládání proměnných.



Obr. 19 – Grafické rozhraní dSPACE s realizací řízení vetknutého nosníku

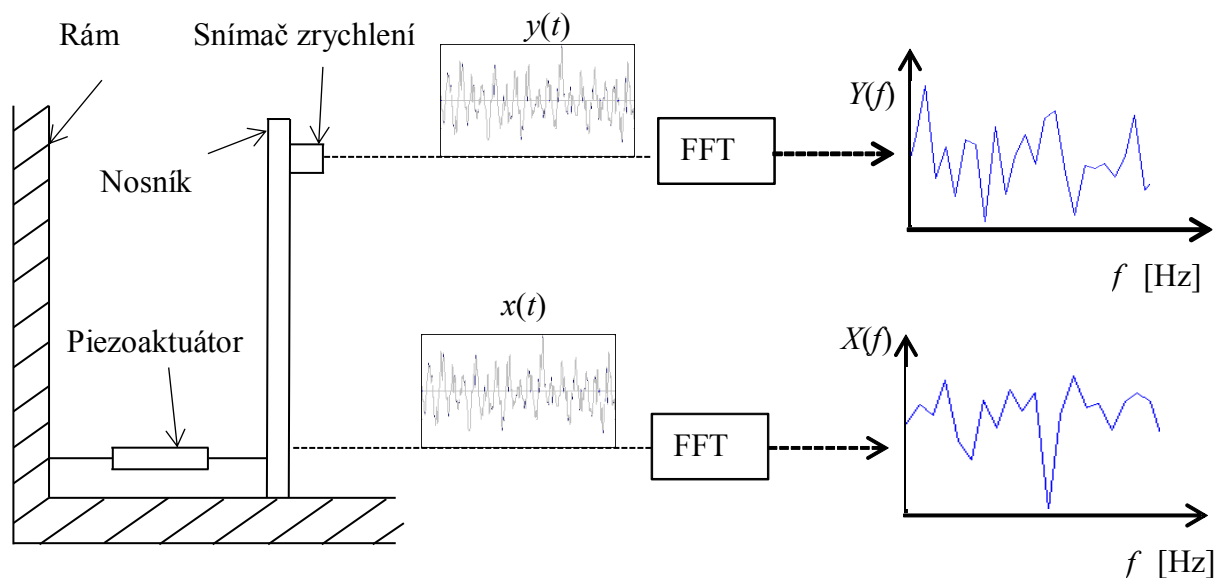
## 4 URČENÍ POTENCIONÁLNĚ NESTABILNÍCH MÓDŮ

Modální analýza slouží k popisu tvarů kmitů mechanických struktur, při jejich frekvenčním buzení. Modální analýza využívá možnosti rozkladu kmitavého děje na dílčí kmity. Tato znalost může posloužit k pochopení a předejití nežádoucí destrukce mechanismu.

Modální analýzu lze povést dvěma způsoby. Prvním způsobem je buzení struktury Diracovým impulzem, který vybudí strukturu na všech frekvencích. K tomuto měření je potřeba přesný Diracův impulz, kterého lze dosáhnout pomocí tzv. modálního kladívka.

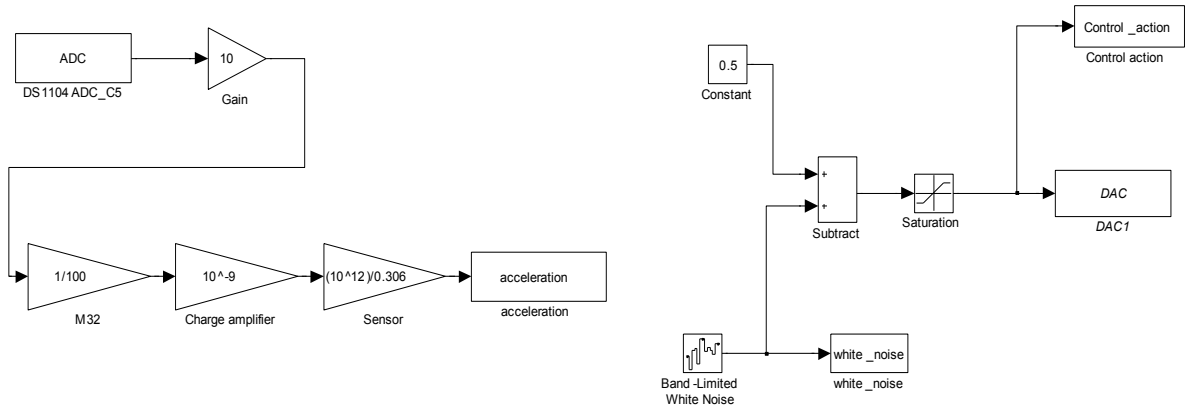
Další možností je buzení bílým šumem, což je náhodný signál s rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotou. [Tůma, 2009]

K experimentální modální analýze posloužila frekvenční odezva otevřeného regulačního obvodu. Analýza byla provedena pomocí bílého šumu, který byl zaznamenán a zároveň sloužil jako vstup do piezoaktuátoru. Zrychlení je měřeno na konci nosníku, což je výhodné zejména proto, že na volném konci nosníku dosahuje amplituda nejvyšších hodnot.



Obr. 20 – Schéma měření frekvenční přenosové funkce

RTI Data



Obr. 21 – Simulační schéma pro experimentální modální analýzu

Pro nejlepší zobrazení přenosové funkce je nutné převést vstup  $y(t)$  a výstup  $x(t)$  do frekvenční oblasti obrazů  $Y(f)$  a  $X(f)$ . K tomu poslouží rychlá Fourierova transformace. Následně je nutné vypočítat spektrální výkonovou hustotu (auto-spectrum) a vzájemnou spektrální výkonovou hustotu (cross-spectrum). Podílem získáme frekvenční přenosovou funkci mezi výstupem a vstupem. Naměřenou charakteristiku bylo také potřeba vážit časovými okny (v našem případě Hanningovou váhovou funkcí s překrytím 2/3).

Spektrální výkonová hustota:

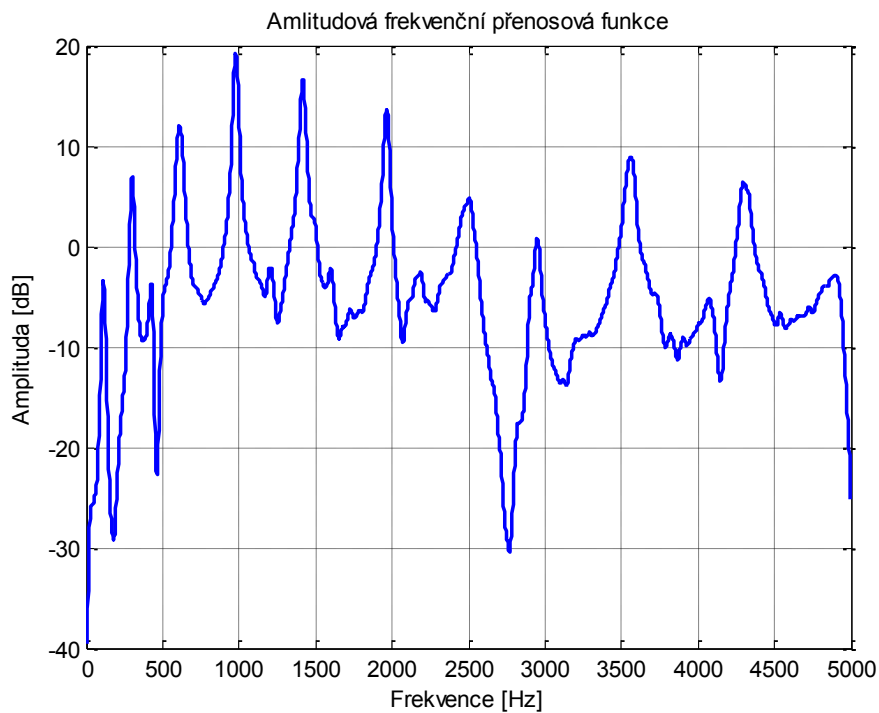
$$S_{yy}(f) = Y(f) \cdot Y^*(f) \quad (4.1)$$

Vzájemná spektrální výkonová hustota:

$$S_{xy}(f) = X(f) \cdot Y^*(f) \quad (4.2)$$

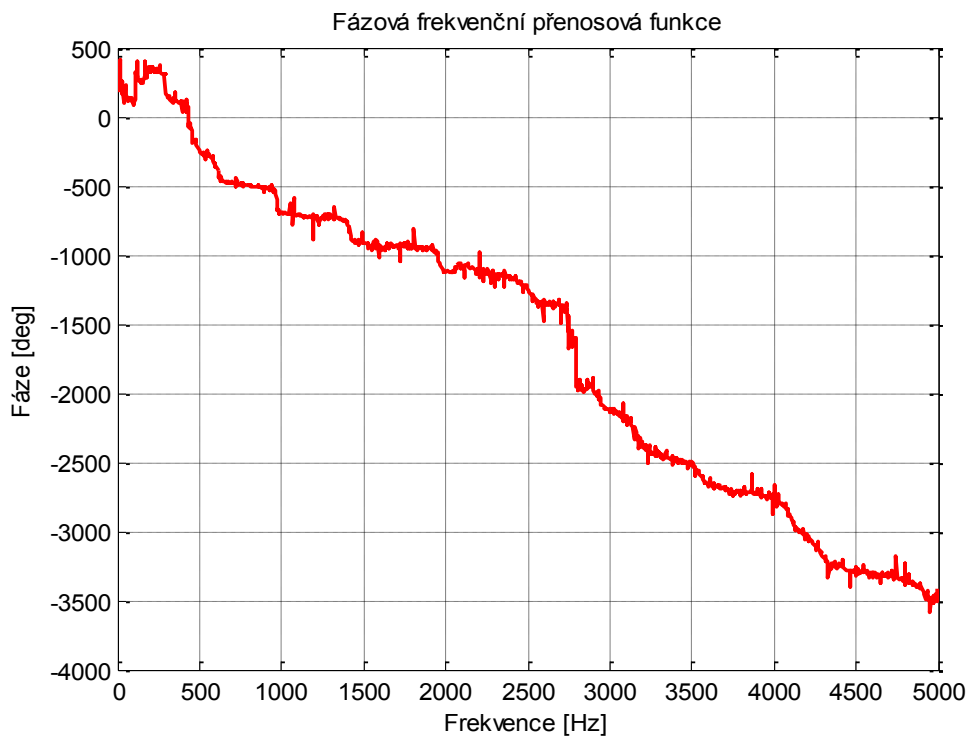
Frekvenční přenosová funkce:

$$H(f) = \frac{S_{xx}}{S_{xy}} \quad (4.3)$$



Obr. 22 – Amplitudová frekvenční přenosová funkce

V grafu amplitudové frekvenční přenosové funkce lze vidět rezonanční vrcholy, které odpovídají módům kmitání.



Obr. 23 – Fázová frekvenční přenosová funkce

V grafu průběhu fáze vidíme, že každý rezonanční vrchol posunuje fázi o  $-180^\circ$ . Je to způsobeno měřením signálu na opačných koncích nosníku. Posunutí fáze způsobuje, že při sudých rezonančních frekvencích se póly posunují směrem k pravé polorovině komplexní roviny, což způsobuje nestabilitu regulačního obvodu. Důsledkem je, že při nestabilitě se mění znaménko ve zpětné vazbě regulačního obvodu, přičemž dochází k zvýšení rozkmitu nosníku.

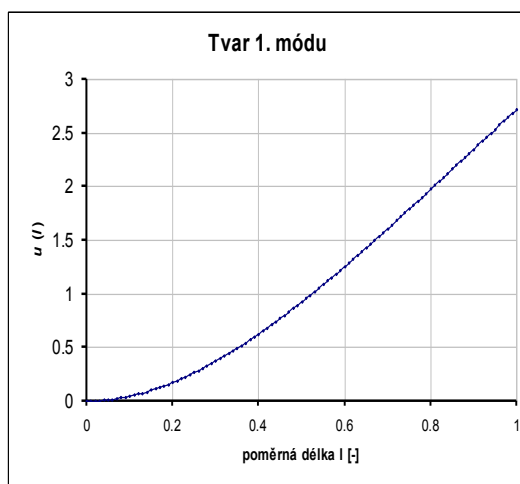
Tyto potenciálně nestabilní módy se také dají ověřit posláním parazitního signálu o vyšetřované frekvenci do piezoaktuátoru.

Tab. 1 – Naměřené rezonanční frekvence nosníku

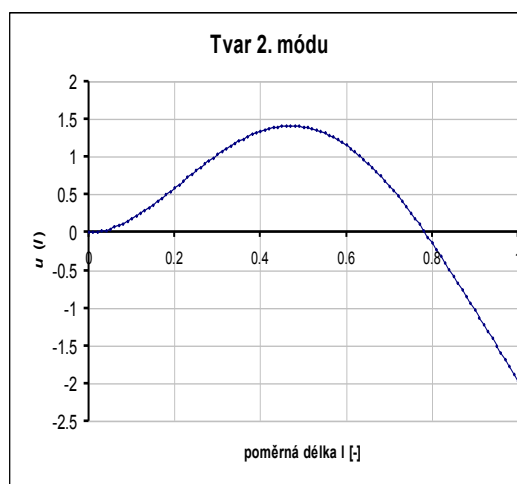
	Experimentální modální analýza
1. mód	17,47 Hz
2. mód	104,8 Hz
3. mód	293,5 Hz
4. mód	614 Hz
5. mód	970,5 Hz
6. mód	1412 Hz
7. mód	1959 Hz
8. mód	2513 Hz
9. mód	2942 Hz
10. mód	3559 Hz
11. mód	4284 Hz
12. mód	4896 Hz

Pomocí programu Matlab a simulace modelu nosníku byly vykresleny tvary prvních sedmi módů kmitu nosníku.

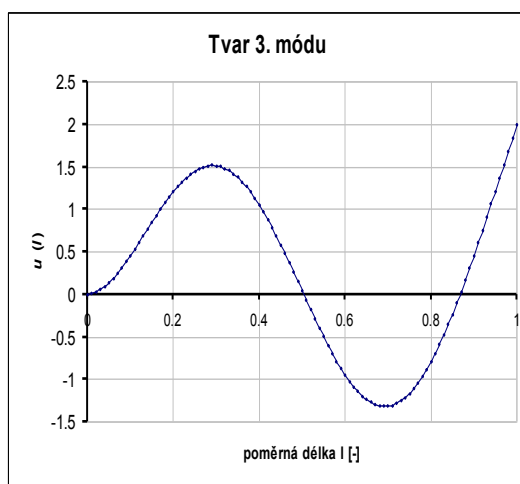




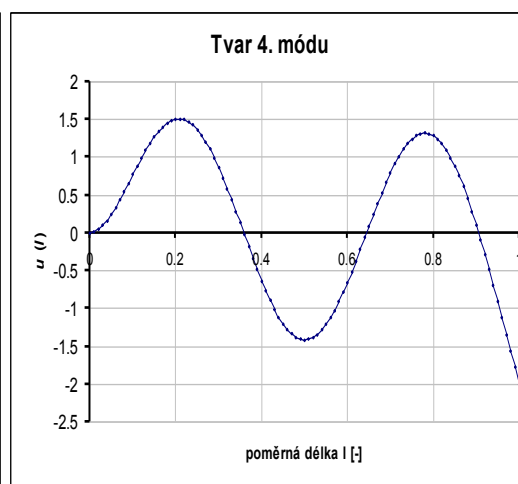
Obr. 24 – Tvar 1. módu



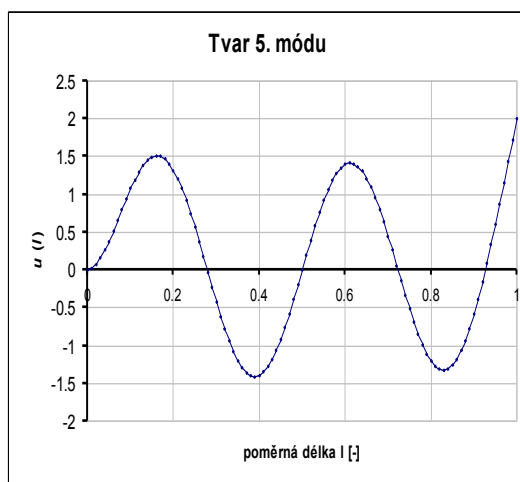
Obr. 25 – Tvar 2. módu



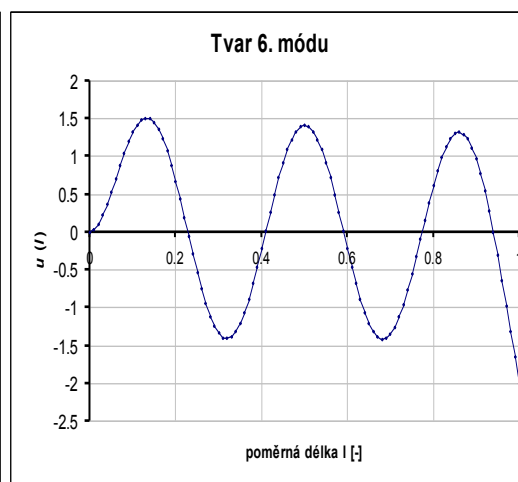
Obr. 26 – Tvar 3. Módu



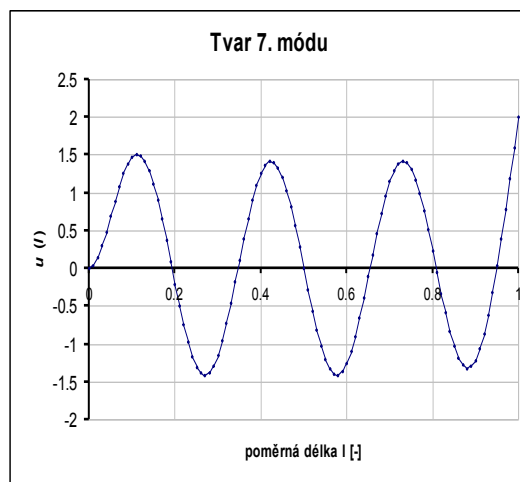
Obr. 27 – Tvar 4. módu



Obr. 28 – Tvar 5. Módu



Obr. 29 – Tvar 6. módu



*Obr. 30 – Tvar 7. módu*

[Šuránek, 2013]

## 5 NÁVRH ELIMINACE MÓDŮ

Pro eliminaci potenciálně nestabilních módů lze využít hned několika metod, například použití filtru otáčející fázi (all-pass filtru) nebo filtru propouštějící pouze okolí určené frekvence (band-pass filtru). V bakalářské práci byly vyzkoušeny oba zmíněné filtry.

### 5.1 Zpětnovazební řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení a band-pass filtrem

Band-pass filtr je filtr, který propouští frekvence v určitém rozsahu a ostatní utlumuje. To má význam, že propouští pouze frekvence v okolí rezonančních vrcholů. Tyto frekvence jsou pak pomocí regulátoru regulovány. V případě potenciálně nestabilního módu je znaménko zesílení záporné, čímž se otočí fáze.

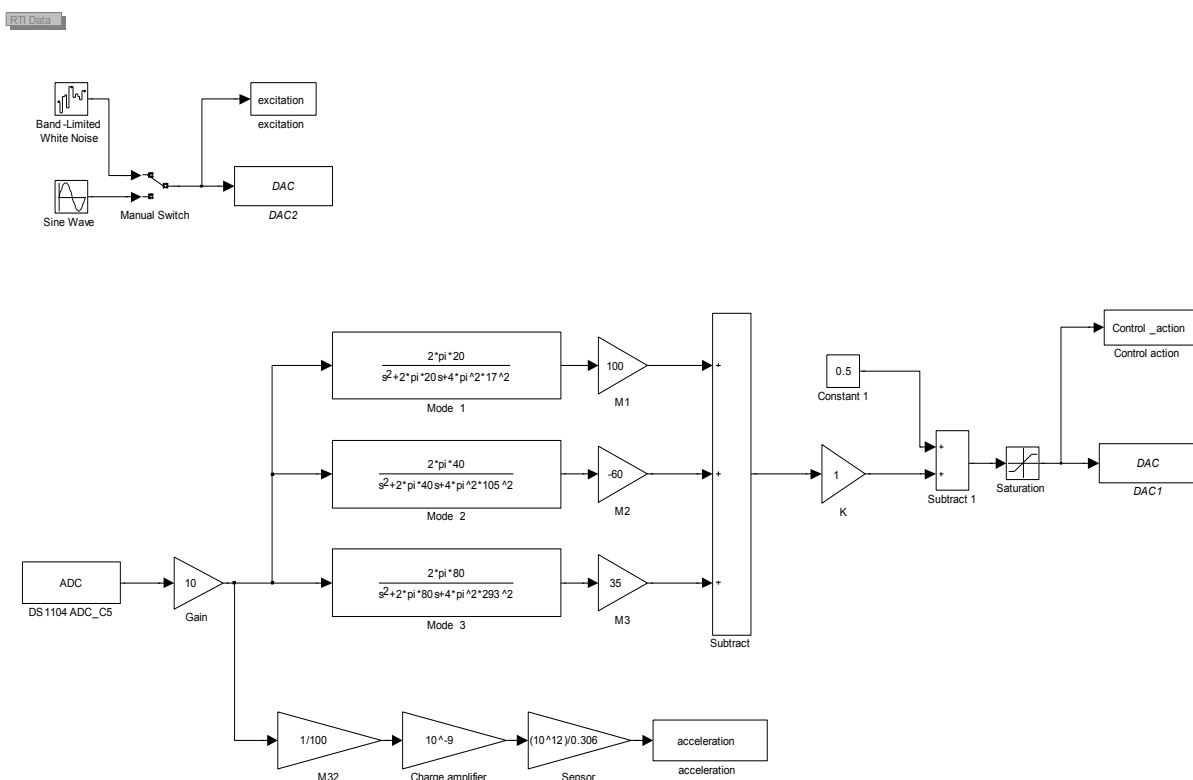
Band-pass filtr má přenos v Laplaceově oblasti komplexně proměnné:

$$G_F(s) = \sum_{i=1}^M \frac{2\pi K_i \Delta f_{BPi} s}{s^2 + 2\pi \Delta f_{BPi} s + 4\pi^2 f_i^2} \quad (5.1)$$

kde je  $K_i$  - zesílení filtru [-]  
 $\Delta f_{BPi}$  - šířka propuštěného pásma [Hz]  
 $f_i$  - frekvence rezonančního vrcholu [Hz]

Tab. 2 – Tabulka nastavení proměnných filtru pro první 3 módy

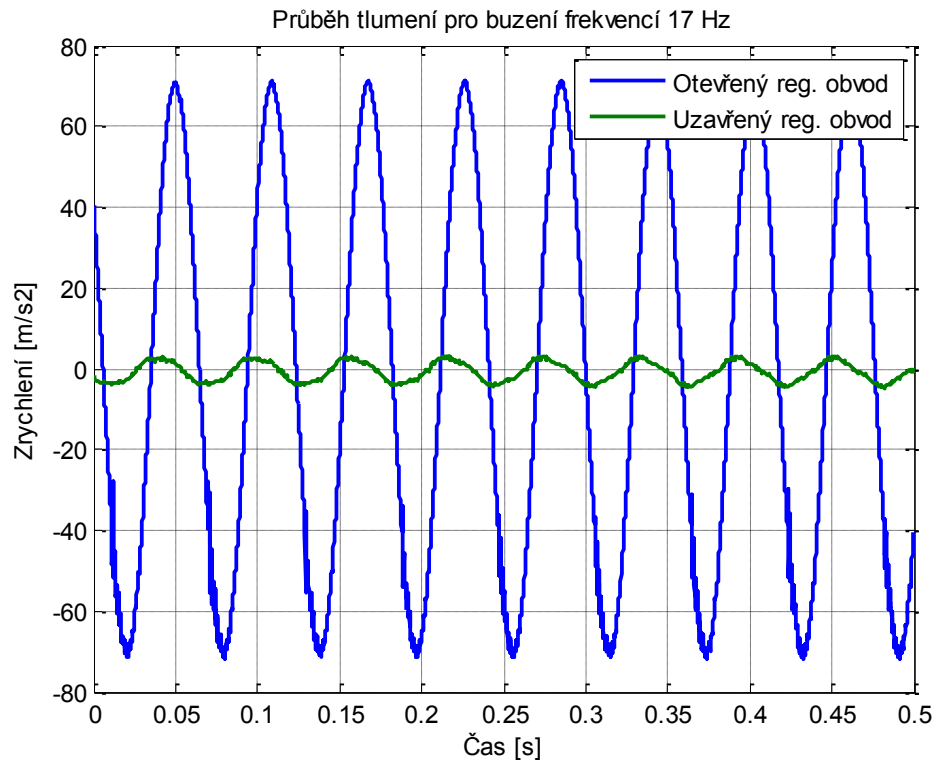
	$K_i$	$f_{BPi}$	$f_i$
1. mód	100	20	17
2. mód	-60	40	105
3. mód	35	80	293



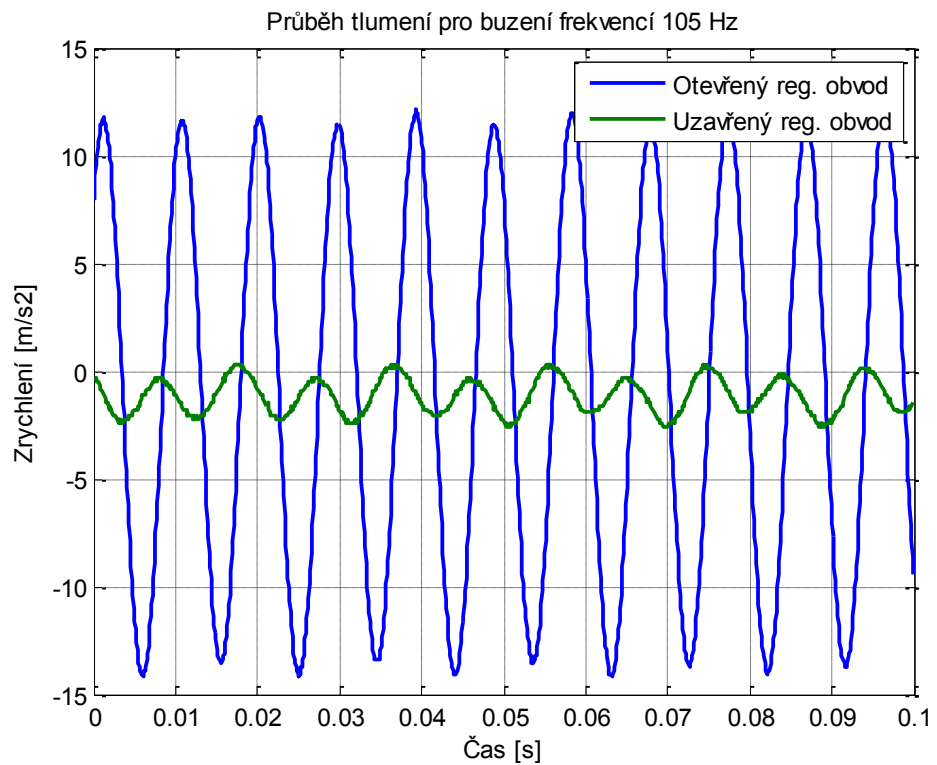
Obr. 31 – Simulační schéma pro piezoelektrický snímač zrychlení s band-pass filtrem

Při kontrole správné funkčnosti modálního filtru, nebylo možné naměřit a porovnat frekvenční přenosové funkce z důvodu malého útlumu na vyšších rezonančních frekvencích, proto se kontrola prováděla porovnáním v časové oblasti s otevřeným regulačním obvodem a uzavřeným regulačním obvodem. Malý rozdíl mezi tlumeným a netlumeným nosníkem ve frekvenční amplitudové přenosové funkci je způsoben vysokou energetickou náročností na utlumení vyšších módů kmitů.

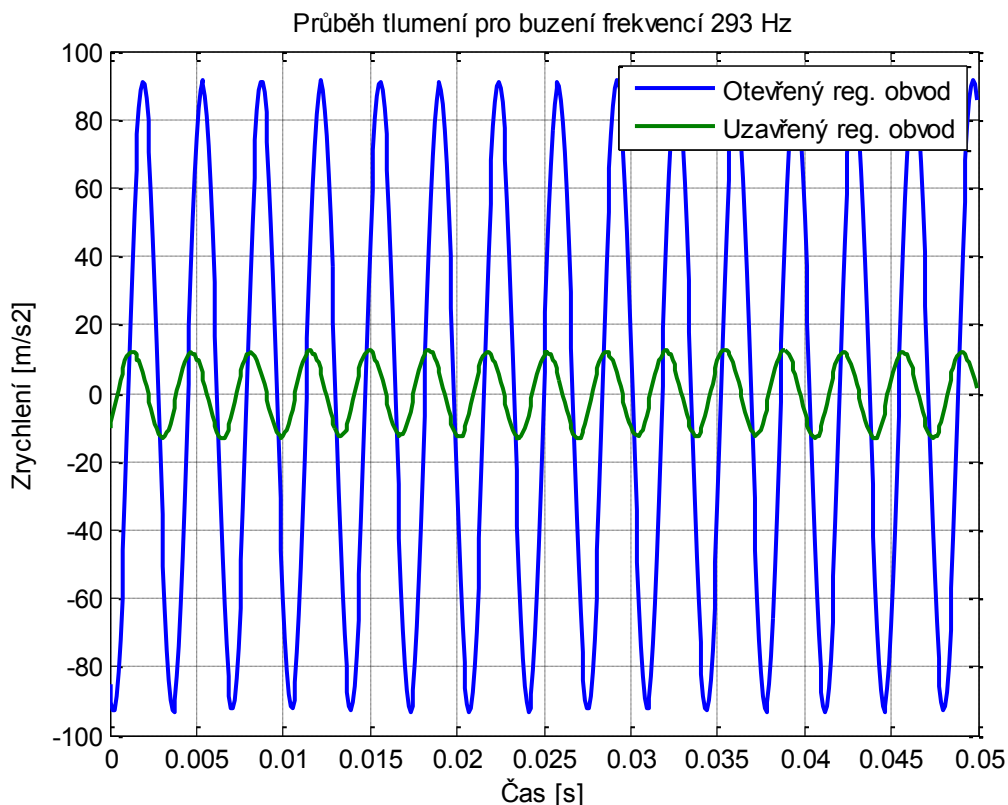
Pro lepší zobrazení skutečného tlumení je nosník buzen na vlastních frekvencích při otevřeném a uzavřeném regulačním obvodu. Záznam signálu z akcelerometru je v časové oblasti, tudíž je zaznamenán signál před a po zapnutí regulace. V první a třetí vlastní frekvenci je útlum přibližně desetinásobný, ve druhé vlastní frekvenci je šestinásobný.



Obr. 32 – Netlumený a tlumený průběh pro první mód



Obr. 33 – Netlumený a tlumený průběh pro druhý mód



Obr. 34 – Netlumený a tlumený průběh pro třetí mód

## 5.2 Zpětnovazební řízení s piezoelektrickým snímačem zrychlení a all-pass filtrem 2. řádu

All-pass filtr funguje na principu otáčení fáze v určitých frekvencích o  $180^\circ$ , čímž umožní řízení regulačního obvodu i v potencionálně nestabilních módech.

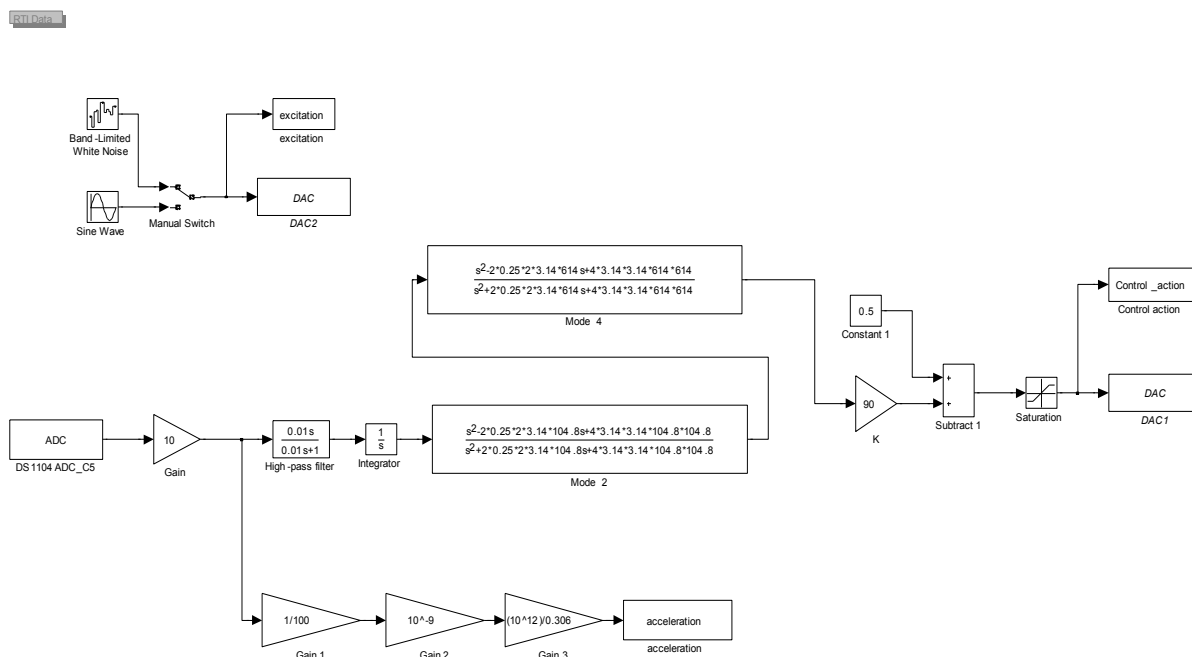
All-pass filtr má přenos v Laplaceově oblasti komplexní proměnné

$$G(s) = \frac{s^2 - 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (5.2)$$

Kde je  $\xi_i$  - koeficient poměrného útlumu i-tého módu [-]  
 $\omega_i$  - vlastní kruhová rychlost i-tého módu [ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

Při sériovém řazení all-pass filtrů můžeme dosáhnout filtru vyššího řádu. Vhodným nastavením filtrů bylo dosaženo řízení na prvních dvou nestabilních módech.

První filtr byl nastaven pro otáčení fáze na druhé rezonanční frekvenci  $f_2 = 104,8$  Hz s koeficientem poměrného útlumu  $\xi_2 = 0,25$ , druhý filtr byl nastaven na čtvrtou rezonanční frekvenci  $f_4 = 614$  Hz s koeficientem poměrného útlumu  $\xi_4 = 0,25$ .

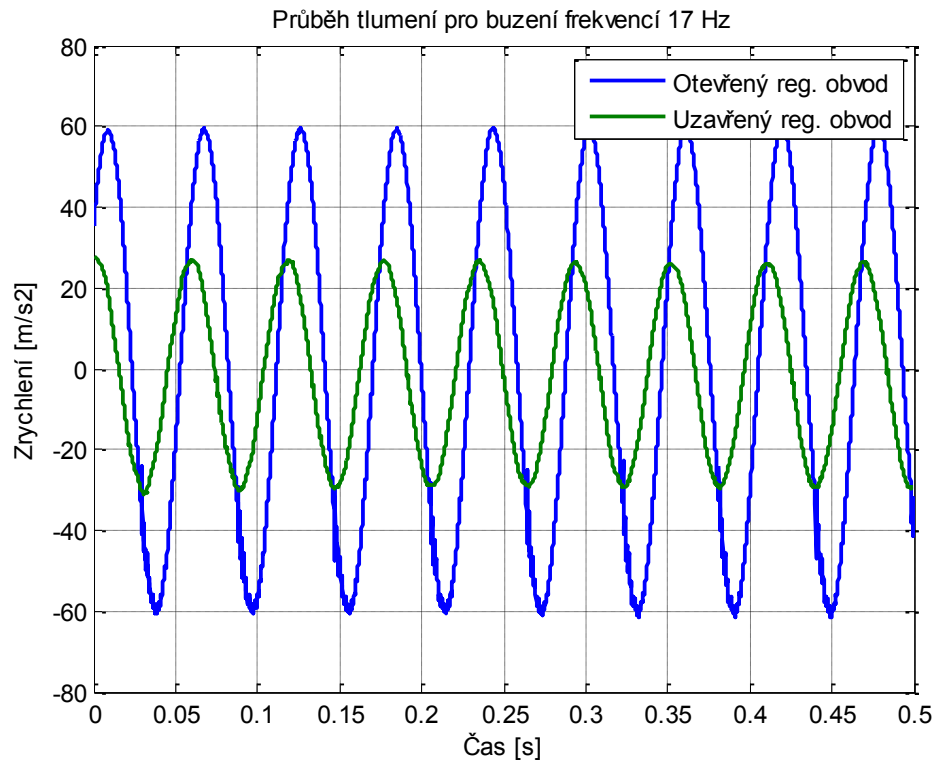


Obr. 35 – Simulační schéma pro piezoelektrický snímač zrychlení s all-pass filtrem 2. Řádu

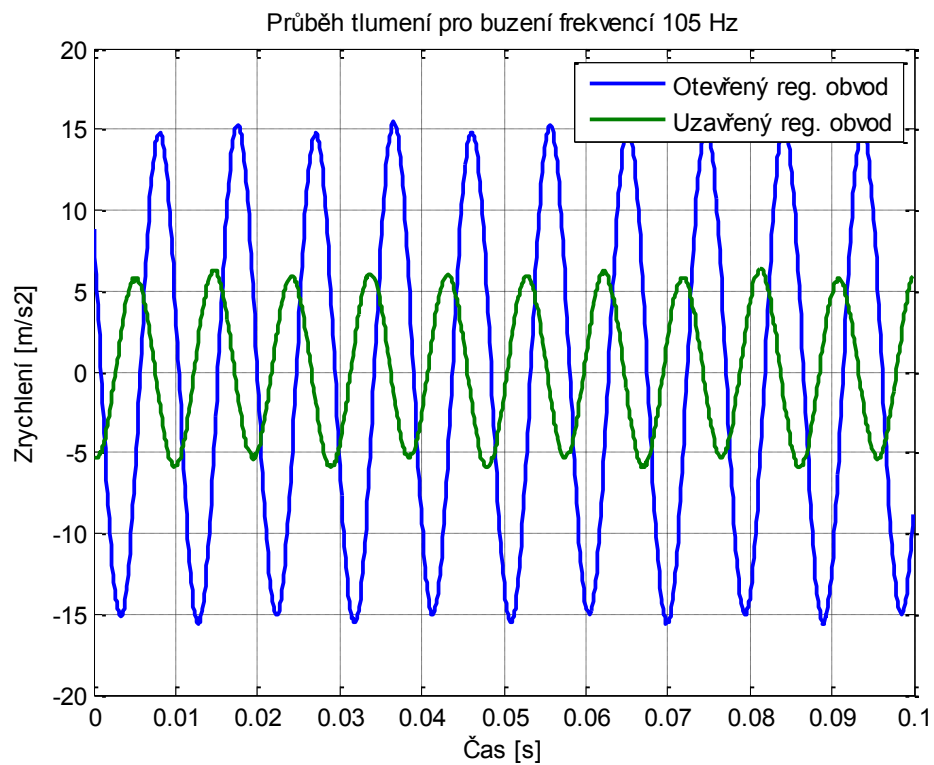
Podobně jako u band-pass filtru bylo velice obtížné naměřit přesně amplitudovou a fázovou přenosovou funkci, na kterých by bylo možné vidět útlum oproti původnímu přenosu a posunutí fáze na druhé a čtvrté vlastní frekvenci nosníku.

Proto byl nejdříve vyzkoušen filtr v simulaci v programu Matlab-Simulink, kde je pro vstup použit sinusový signál o frekvenci, u které má filtr otáčet fázi. Výstup byl pak vykreslen zároveň se vstupem a porovnán. V obou případech filtr fázi posunul dle očekávání.

Měření probíhalo obdobně. Nosník byl vybuzen na vyšetřovaných frekvencích. Záznam z akcelerometru byl pořízen při otevřeném a uzavřeném regulačním obvodu v časové oblasti. Z průběhů signálů lze vidět, že útlum je na prvních dvou vlastních frekvencích přibližně poloviční a regulátor reguluje i na druhé vlastní frekvenci.



Obr. 36 – Netlumený a tlumený průběh pro první mód



Obr. 37 – Netlumený a tlumený průběh pro druhý mód



## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá měřením vibrací mechanických struktur. V první části práce jsou popsány typy snímačů vhodných pro měření vibrací a jejich analýza. V druhé části je navrženo vylepšení laboratorního modelu pro aktivní tlumení vibrací tak, aby bylo možné měřit vyšší frekvence kmitů než doposud, a abychom tedy mohli provést analýzu a následně eliminovat potenciálně nestabilní módy.

Původní laserový triangulační snímač výchylky byl nahrazen vybraným snímačem zrychlení umístěným na volném konci nosníku, kde je výchylka největší. Systém byl aktivně tlumen pomocí piezoaktuátoru, který kvůli malému zdvihu, ale vysoké rychlosti a velké síle zdvihu je umístěn co nejbližší vetknutí nosníku.

Výběr snímače byl proveden s ohledem na citlivost a měřený rozsah frekvencí. Z důvodu požadavku na měření frekvencí do 5 kHz, byl vybrán piezoelektrický akcelerometr firmy Ono Sokki, který poskytuje frekvenční rozsah do 20 kHz s citlivostí  $0,306 \text{ pC/ms}^{-2}$ . K tomuto snímači bylo také nutné připojit nábojový zesilovač, který převádí měřený náboj na napěťový signál. Dále bylo zapotřebí použít napěťový zesilovač.

Vybraný snímač zrychlení byl zapojen do zpětnovazebního řízení vetknutého nosníku a sestavením simulačního schématu s rychlostní zpětnou vazbou byl ověřen regulační proces.

Experimentální modální analýza byla provedena pomocí bílého šumu, který byl výstupem do piezoaktuátoru a měřením zrychlení na konci nosníku. Oba signály byly zaznamenány. Z těchto signálů se vypočetla frekvenční a fázová přenosová funkce, která byla vykreslena v grafu, kde je možné vidět rezonanční vrcholy. Tyto vrcholy odpovídají módům kmitání. Vlivem umístění snímače a akčního členu na opačné straně nosníku mají liché módy tendenci se stabilizovat vlivem zpětné vazby (póly se posouvají v komplexní rovině vlevo a stabilizují). Naopak sudé módy mají tendenci se destabilizovat – posouvají se doprava. V tomto případě jsou stabilní módy liché a nestabilní sudé. Důsledkem je, že se mění znaménko ve zpětné vazbě regulačního obvodu, přičemž dochází na určitých frekvencích k posunutí akčního zásahu o  $90^\circ$  nebo  $270^\circ$  a zvyšuje rozkmit nosníku.

Pro regulaci i v potenciálně nestabilních módech lze použít all-pass filtr, který obrací fázi v rezonančním vrcholu o  $180^\circ$ , nebo band-pass filtr, který propouští jen frekvence v okolí rezonančního vrcholu.

V bakalářské práci byl změřen band-pass filtr pro eliminaci prvních tří módů kmitu. Tlumení bylo ověřeno pomocí buzení nosníku vyšetřovanou frekvencí v otevřeném regulačním obvodu (při neaktivním tlumení) a uzavřeném regulačním obvodu (při aktivním tlumení). Naměřené průběhy v časové oblasti byly porovnány, čímž se zjišťovalo, že při uzavřeném regulačním obvodu je útlum značně vyšší.

Dále byl ověřen all-pass filtr, který otáčí fázi na druhé a čtvrté vlastní frekvenci nosníku. Obdobně jako u band-pass filtru byla ověřena regulace na první a druhé frekvenci, avšak kvůli vysokým energetickým nárokům na utlumení vyšších módů nebylo možné vyšší frekvence měřit z důvodu omezení piezoaktuátoru.

Při porovnání band-pass filtru a all-pass filtru bylo zjištěno, že band-pass filtr dosahuje řádově vyššího útlumu. Dosažené výsledky jsou velice uspokojivé, avšak tento vědní obor si zaslouží další zkoumání.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

CROKER, M. *Handbook of noise and vibration control*, New York: Wiley, 2007, 296 s. ISBN 978-0-471-39599-7.

DSPACE, *Controller Board* [online]. 2013 [cit. 2013-01-27]. Dostupný z www: < <http://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/singbord/ds1104.cfm> >

FARANA, R., SMUTNÝ, L., VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ M. & WAGNEROVÁ, R. 2008 *Doporučení pro psaní odborných textů z oblasti automatizace a informatiky*. 1. vyd. Ostrava: Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2008. 80 s. ISBN 978-80-248-1925-9.

FULLER CH.C., *Active control of vibration*. Academic Press, 1996, ISBN 0-387-40649-2.

GAWRONSKI W.K., *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*, Springer New York, ISBN 0-387-40649-2.

HE JIMIN & FU ZHI-FANG, *Modal analysis*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN 9-0-7506-5079-6.

METRA MESS, *Signal Conditioners* [online]. 2013 [cit. 2013-01-27]. Dostupný z www: < [http://www.mmf.de/signal\\_conditioners.htm](http://www.mmf.de/signal_conditioners.htm) >

NOSKIEVIČ P., *Modelování a identifikace systémů*, Ostrava, Montanex, 1999, 280 s. ISBN 80-7225-030-2.

ONO SOKKI, *Accelerometers* [online]. 2013 [cit. 2013-01-27]. Dostupný z www: < [http://www.onosokki.co.jp/English/hp\\_e/products/keisoku/s\\_v/np\\_series.html](http://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/products/keisoku/s_v/np_series.html) >

ONO SOKKI, *Charge converter* [online]. 2013 [cit. 2013-01-27]. Dostupný z www: < [http://www.onosokki.co.jp/English/hp\\_e/products/keisoku/s\\_v/ch6130\\_6140.html](http://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/products/keisoku/s_v/ch6130_6140.html) >

PREUMONT A. & SETO K., *Active control of structures*. New York: WILEY, 2008, 296 s. ISBN 978-0-470-03393-7.

PREUMONT A., *Vibration control of Active Structures. An Introduction 3<sup>rd</sup> Edition*. Berlin, Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-94-007-2032-9.

ŠURÁNEK, P. *Aktivní tlumení vibrací*, diplomová práce. Ostrava: VŠB – TUO, Katedra automatizační techniky a řízení, 49 s. Vedoucí práce: Tůma, J.

TME, *Dotyková čidla* [online]. 2013 [cit. 2013-01-27]. Dostupný z www: <[http://www.tme.eu/cz/katalog/dotyková-cidla\\_100439/?id\\_producer=884](http://www.tme.eu/cz/katalog/dotyкова-cidla_100439/?id_producer=884)>

TŮMA, J. - WAGNEROVÁ, R. - FARANA, R. - LANDRYOVÁ, L. *Základy automatizace*. 1. vyd. Ostrava, VŠB-TUO, 280s. Dostupný také z www <http://vyuka.fs.vsb.cz>. ISBN 978-80-248-1523-7.

TŮMA, J. *Diagnostika strojů*, 1. vyd. Ostrava: Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009. 138 s. ISBN 978-80-248-2116-0.

TŮMA, J. *Signal processing*, 1. vyd. Ostrava: Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009. 156 s. ISBN 978-80-248-2114-6.

TŮMA, J. *Složité systémy řízení, I. Díl: Regulace soustav s náhodnými poruchami*, 1. vyd. Ostrava: Skripta VŠB - TU Ostrava, 1998. 151 s. ISBN 80-7078 - 534 - 9.

VÍTEČEK, A. & VÍTEČKOVÁ M., 2008 *Základy automatické regulace*. 1. vyd. Ostrava: Katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2008. 244 s. ISBN 978-80-248-1924-2.